

T-RTM ELJÁRÁSSAL GYÁRTOTT ALKATRÉSZEK GYÁRTÁSI FOLYAMATÁNAK KIHÍVÁSAI, KÜLÖNÖS TEKINTETTEL AZ ERŐSÍTŐANYAGOK KEZELÉSÉRE

CHALLENGES OF THE T-RTM MANUFACTURING FOCUSING ON THE PREFORMING PROCESS, SENSING AND HANDLING OF REINFORCEMENT MATERIALS

Péter Bence^{1,2}
Hegedűs Gergely^{1,2}
Czigány Tibor^{2,3}

¹evopro systems engineering Kft.

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

³MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

ABSTRACT

The aim of this study is to give an overview of the new possibilities of composite materials manufacturing as well as the methods of preform making. Furthermore we introduce a test plan designed for study of pre-preg textile wrinkle. That is important from preforming process point of view. The results will be used for design of a newly setup production line of modern composite products.

1. BEVEZETÉS

Kompozitnak azon több komponensű anyagot nevezzük, amely szívós mátrixból, és a teherviselés kitüntetett irányában a szerkezeti anyag szilárdságát növelő, nagy szilárdságú és rendszerint nagy rugalmassági modulusú erősítőanyagból áll. Közöttük kiváló adhéziós kapcsolattal, amely hosszú távon, tartós- és ismétlődő terhelések esetén is fennáll. Bár az emberiség évezredek óta használ természetes alapú kompozitokat (pl. vályogtégla), műszaki célú felhasználásuk az utóbbi nyolc évtizedben valósult meg [1]. Műszaki célú kompozitok fejlesztésére az utóbbi két évtizedben egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek járműipari és egyéb ipari szereplők. Ennek oka a törekvés a gyártott járművek tömegcsökkentésére, ugyanis a kompozit alkatrészek tömegre vetített szilárdsága jobb a fémekénél, továbbá az erősítés irányfüggően testre szabható, így a terhelés

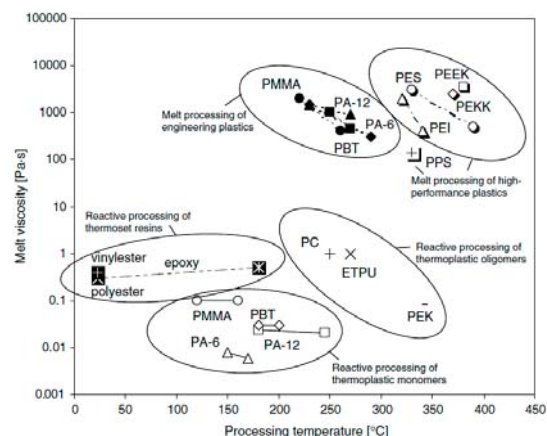
irányának megfelelően tartalmazhat erősítést az adott alkatrész. A tömegcsökkentést a gazdaságosabban üzemeltethető járművek gyártása indokolja, ami környezetvédelmi szempontok miatt fontos fejlesztési irány [2]. Műszaki felhasználású polimer kompozitok hőre lágyuló vagy hőre keményedő polimer mátrixból és általában szálerősítésből (szén-, üveg-, bazaltszál) állnak. Hőre keményedő mátrix végfelhasználás előtt oligomer állapotban van, gyártás során jön létre a sűrűn térhálós polimer szerkezet, másszóval kémiai reakció játszódik le a feldolgozás során. Gyakori gyártási eljárások közé tartozik a kézi laminálás és a nyomásos impregnálás (RTM). Kézi laminálás során az erősítőanyag manuális módszerrel kerül a mátrixszal átítatásra, így a technológia sorozatgyártott alkatrészek készítésére gazdasági szempontból nem alkalmas. A második világháború partraszálló csónakjait készítették például ezzel a technológiával [1]. Nyomásos impregnálás esetén száraz erősítőanyagot helyeznek a gyártandó termék negatív szerszámba, majd nyomás és esetleg vákuum segítségével átítatják mátrixanyaggal. Ez a technológia már nem igényel nagy mennyiségű kétkézi munkát, ciklusideje azonban még mindig túl nagy a nagysorozatú gyártáshoz. A hőre keményedő polimerek további hátránya az, hogy életciklusuk végén újrafelhasználásuk nehézkes [1].

1.1. Termoplasztikus mátrixú kompozitok

Hőre lágyuló mátrix felhasználásával ezidáig egészen más jellegű kompozitok készültek, mint hőre keményedővel. A hőre lágyuló polimerek egyik legjellemzőbb feldolgozási módja a fröccsöntés. A fröccsöntéssel előállított kompozit esetén, a granulátumba adagolt vágott szálak adják az erősítést. Ezzel a technológiával korlátozott erősítés érhető el, ám a ciklusidő rövidege miatt alkalmas nagy sorozatú, nagy méretpontosságú alkatrészek gyártására. Van lehetőség préseléses gyártási eljárásra is, ahol a folytonos erősítésű termék az erősítőanyagra helyezett polimer film megolvasztásával és préselésével készül, elterjedtsége azonban alacsony [3]. A hőre lágyuló kompozitok terjedését gátolja, hogy a feldolgozás során ömledék állapotba kerülő polimer viszkozitása túl nagy a folytonos erősítőanyag megfelelő átításához [3]. A hőre lágyuló polimerek sajátos mechanikai tulajdonságai (ütésállóbb, szívósabb) és újrafeldolgozhatósága indokolja olyan új gyártástechnológiák kifejlesztését, amellyel alacsony ciklusidővel, magas fokú automatizáltsággal készíthetők hőre lágyuló polimer mátrixú kompozitok, amelyek erősítőanyaghányad tekintetében felveszik a versenyt a hőre keményedőkkel, és életciklusuk végén újrahasznosíthatóak. A megoldást a polimerek reaktív feldolgozása, azon belül is a hőre lágyuló injektálási (T-RTM) technológia jelentheti [3].

1.2. Reaktív feldolgozás lehetőségei.

A reaktív feldolgozás során a hőre lágyuló polimerek monomer, vagy oligomer állapotban kerülnek feldolgozásra és a folyamat végére polimerizálódnak. Más szóval a hőre keményedő polimerekhez hasonlóan kémiai állapotváltozás zajlik le a folyamat során, ám a végeredmény hőre lágyuló, keresztkötéseket nem tartalmazó polimer lesz. Több polimer többféle módon történő feldolgozására van laboratóriumi példa, amely alkalmas lehet a reaktív technológiához. Lehetséges termoplasztikus poliuretánok, polibutilén-tereftalát, polikarbonát, poliéterketon és poliamidok feldolgozása is ilyen módon. Az 1. ábra jól szemlélteti a különböző polimerek ömledékének viszkozitását a hőmérséklet függvényében [3].



1. ábra Áttekintés a különböző polimerek reaktív feldolgozási módjánál használatos hőmérséklet és viszkozitás értékekről. [3]

A legígéretesebb a poliamidok családja, azon belül is a PA6. Ennek az anyagnak a reaktív feldolgozása igényli a legkisebb hőmérsékletet a kis viszkozitás mellett. Több kutatócsoport [4, 5] is vizsgálta a reaktív feldolgozással készített poliamid alkatrészek tulajdonságait a gyártási folyamat során. A kísérletek eredményei igazolták, hogy a reaktív eljárással készített poliamid alkatrészek mechanikai tulajdonságai kiválóak lehetnek kompozit alkatrészek készítésére. Poliamid reaktív feldolgozására napjainkban már az ipar szereplői is kínálnak megoldásokat [6, 7]. A jellemző feldolgozási módszer az úgynevezett T-RTM eljárás, amely során az előformázott erősítőanyagot egy zárható szerszámba fektetik, majd a temperált szerszámba a poliamid 6 monomerét, kaprolaktámot befecskendezik. A monomer megfelelő aktivátor és katalizátor hozzáadásával polimerizálódik. Ezen gyártástechnológia kihívása a kellően rövid ciklusidő elérése, amely nagyfokú automatizáltság esetén pár percre szorítható le. Neves külföldi gyártók komplex megoldásokat kínálnak T-RTM gyártósorra. A Krauss-Maffei és az Engel megoldásai mind teljesen automatizáltak, a gyártósor a 2D erősítőanyagot formára szabja, előformázza, majd T-RTM présben elkészíti a kész kompozit terméket, mindezt emberi kéz érintése nélkül. Az így készített alkatrész erősítőszál-tartalma magas, utómunkálást nem igényel. Készítenek így a bemutató gyártósorokon lapátokat, de sportautó tetőpanelt is [8, 9]. A gyártósor egyik nagy kihívása a különböző folyamatok összehangolása az automatizált

mozgatórendszerek használatával, továbbá a pontos előformázási folyamat kialakítása, hiszen a 2D erősítőanyag megfelelő formára alakulása meghatározó a nagyfokú pontosság eléréséhez.

1.3. Erősítőanyagok kezelésének kihívásai

Az előformázási folyamat paraméterei nagyban befolyásolják a késztermék méretpontosságát. Fontos tényező az erősítőanyag és az előformázott félkész termék pozicionálásának pontossága. Mivel e tekintetben nem áll rendelkezésre általános érvényű információ a szakirodalomban, így az alkatrész geometriájától függően mindenképpen szükséges a különböző megoldások áttekintése és az egyes megoldási módok szimulálása, tesztelése. Az erősítőanyag automatizált mozgatasakor az anyag rögzítésére többféle megfogót alkalmaznak. Létezik vákuumtappancsos, Bernoulli-szívókorongos és tűs megfogós megoldás is [10-12]. A nagy pneumatikuselem-gyártók általában Bernoulli-rendszerű, vagy tűs megfogós megoldásokat kínálnak szövetek mozgatására. A különböző működési elvű eszközök tesztje elengedhetetlen a megfelelő pontosság eléréséhez. Az erősítő textiliát elő kell formázni a késztermék 3D geometriájának megfelelően, és ezt az előformázott erősítőanyagot lehet már a T-RTM prés szerszámba helyezni. Az előformázási eljárás a következőképp zajlik le. Az erősítő textília szálkötegei a formázó szerszámban sűrűlőerő hatására elcsúsznak egymáson, majd a korábban felhordott, megolvasztott binder anyag lehűlésével a forma rögzül. Azonban ha az alakváltozás egy bizonyos mértéket meghalad, az erősítőszövet kötegei már nem tudnak elcsúszni egymáson és sérülhet a szövetet felépítő szálköteg, vagy nem tökéletes lesz az alakadás. Több kutatócsoport vizsgálta különböző típusú textiliák formázási tulajdonságait, illetve állítottak fel textilmechanikai összefüggéseket erősítőanyag előformázhatóságára. A vizsgálataik rávilágítottak arra, hogy a felállított matematikai modellek nem kellő pontossággal képezik le a valóságot, az előformázási folyamat vizsgálata az alkatrész geometriájától függően mindenképpen célszerű [13, 14]. A végleges termékformát megközelítő forma rögzítéséhez megfelelő binder anyagot kell használni. Ezt a kötőanyagot az erősítő textil rétegek közé kell

juttatni, majd hő hatására képlékeny állapotúvá tenni, hogy megtörténhessen az összeállított erősítőanyag rétegek formázása. A formázott textil+binder rendszer lehűlésével a geometriája rögzül, és kivehető a szerszámból. Több réteg erősítőanyag esetén rendkívül fontos a homogén átmelegítés, amely nagymértékben függ az alkalmazott melegítési technológiától (pl.: IR-, forrólevegős-, kontaktfűtés) és annak paramétereitől. A melegítés mellett további fontos paraméter a szerszámba kerülő erősítőanyag víztartalma, amely nagymértékben befolyásolhatja a végtermék minőségét.

A cikk célja egy tesztkészülék fejlesztésének bemutatása, amely egy automatizált, T-RTM eljárással működő termoplasztikus mátrixú, folytonos erősítő anyagú kompozit alkatrészt gyártó sor kivitelezéséhez kapcsolódik. A gyártósor egyes elemeinek (pl. manipulátorok, előformázó prés, előmelegítő egység) kialakításánál figyelembe kell venni az erősítőanyagok kezelhetőségét, és az ehhez kapcsolódó kihívásokat. A kísérleti gyártósor mozgató, előformázási és előmelegítési paramétereinek meghatározásához különböző kísérletek elvégzése, és ezen kísérletek elvégzéséhez egy tesztkészülék szükséges. Az elvégzendő méréseket célszerű egy összetett teszt sorozat keretében megvalósítani.

2. KÍSÉRLETI BERENDEZÉS FEJLESZTÉSE

A következő fejezet a tervezett kísérletek leírását és a kísérletek elvégzéséhez szükséges tesztberendezés fejlesztését mutatja be.

2.1. Kísérletterv

A korábban vázolt problémák alapján az elvégzendő kísérleteket három nagy csoportra osztottuk.

Textil mozgatása manipulátorokkal

A legelső témakör, amiben információra van szükségünk az erősítőszövetet mozgató megfogók működésének elemzése. Vizsgálni kell, hogy az adott megfogó képes-e biztosan megemelni egy réteg erősítőszövetet. Ha igen, akkor érdemes tovább vizsgálni a működést. Amennyiben egy réteg erősítőanyaggal működőképes a megfogó, el kell végezni a kísérleteket több réteg erősítőanyag manipulálásával is. További kísérleteket kell

annak érdekében végezni, hogy megállapítsuk, egy megfogó körülbelül mekkora területű anyagot képes megemelni, és ezáltal számítható legyen a gyártósorban alkalmazandó megfogók száma. Célszerű kísérletek lefolytatása kombinált megfogókkal is (pl.: tűs megfogók és Bernoulli szívókorongok, vagy vákuumtappancsok használatával). Bernoulli-megfogók, illetve vákuumtappancsok használata a már előformázott alkatrész estén tűnik célszerűbbnek. Ha lehetséges lenne egy készülékkel mozgatni a formára vágott nyers szövetet és a formázott előgyártmányt, akkor kiküszöbölhető lenne az emberi kézzel való mozgatás bizonytalansága, ismételhetővé válna. Ennek megfelelően a tesztkészülékben vizsgálni kell tudni a megfogók elhelyezésének geometriáját, az anyag lehajlási tulajdonságait, a megfogás közben és mozgatás alatt a textil pozicionálásának pontosságát, a pozicionálás ismételhetőségét és a textil viselkedését a présszerszám alá mozgás közben.

Előmelegítés

Célszerű vizsgálni a binder által kialakult kötés minőségét, merevségét, a megfelelő merevséghez szükséges binder réteg vastagságát, továbbá a manipulátor okozta hatásokat a binder rétegre, és ennek a befolyását a folyamatra. Vizsgálandó, hogy szükséges-e a présszerszám temperálása, vagy megfelelő lehet-e alumínium szerszámfelek használata, hőmérséklet-szabályzás nélkül a forma kialakításához. Az egyes rétegek felmelegítési és lehűlési paramétereinek, hőmérséklet eloszlásának vizsgálatát érdemes a szövetbe integrált optikai szálas szenzorral (pl. FBG szenzorral) vizsgálni, mivel a szenzor kis átmérőjének és flexibilitásának köszönhetően könnyen beépíthető, nem árnyékol és így lehetséges lenne közvetlenül a minta hőmérsékletét és a rétegek közötti hőterjedést mérni.

Préselés folyamata

Préselési folyamat számos vizsgálandó paraméterrel rendelkezik. Mindenekelőtt különböző típusú erősítőszövetek formára alakíthatóságának elemzését érdemes elvégezni és felállítani egy listát a felhasználható anyagok típusáról. Továbbá a szerszámba helyezés

pontosságát is vizsgálni kell, a legfontosabb kísérlet, hogy a manipulátorral elérhető-e akkora pontosság, hogy az előformázott alkatrész utómunkálást (szélezést) ne igényeljen. A tesztkészülékben vizsgálni kell tudni a textil viselkedését a présszerszám lemozgása közben, a préselés után a kialakult geometria túrésát, a préselés után a kialakult előforma visszarugózását, geometriai változásait, a geometriától függő rétegrendezéseket, átlapolásokat, illetve ezek ismételhetőségét is.

2.2. Tesztkészülék fejlesztése

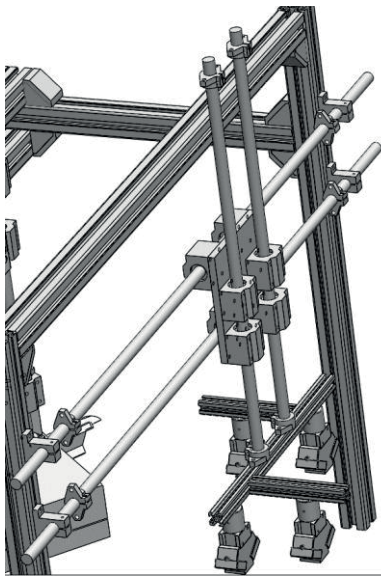
A tesztkészülék a fent leírt kísérletek elvégzésére készül. A tesztpadnak olyan méretűnek kell lenni, hogy felfogatható legyen rá egy tesztprés, az erősítőanyagot mozgató megfogók és a melegítéshez használt fűtőelemek is. A tesztkészülékben lévő elemek mozgatása kézzel történik, fix ütközőkig, amely szimulálja a gyártósoron belül a manipulátorok programozott, ismételhető pozícióit, így el lehet végezni a fent leírt vizsgálatát a megfogóknak. További követelmény a szétszerelhető, könnyen szállítható szerkezet kialakítása is. Követelményként állítottuk fel továbbá, hogy a tesztek végeztével az építőelemek lehető legnagyobb része felhasználható legyen a végleges gyártósorban. A tesztkészülék alapvázát célszerű alumínium-hornycs profilos elemekből felépíteni (pl. Bosch-Rexroth). Megfelelő méretű lenne egy 1000x1000x800 mm méretű alappokeret készítése az 2. ábrán látható módon.



2. ábra Az alppokeret koncepciója előformázás illetve manipulálás vizsgálatához.

A megfogók rögzítése 20x20 mm-es hornycs profilokkal lenne ideális, ezeket 16 mm átmérőjű tengelyekre fogatnánk fel, amelyet lineáris golyós vezetékeken át rögzítenénk egy acéllemezhöz és az acéllemez vízszintesen a

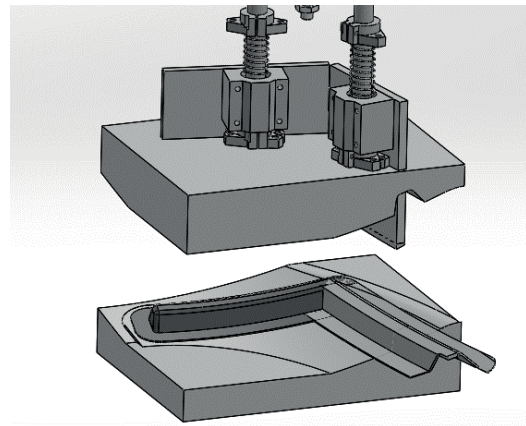
profilra rögzített tengelyeken futna, szintén lineáris csapágyakon. Így a manipulátoron lévő megfogók számára csak levegőellátást kell biztosítani, mozgásuk kézi erővel kivitelezhető mind vízszintes, mind függőleges irányban. A tengelyek, vezetékek és tengelyvégek mind beszerezhető, kereskedelmi forgalomban kapható elemek. A leírt készülék felépítését a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra A megfogók vizsgálatához készített alapkeret, amelyen a megfogók találhatók.

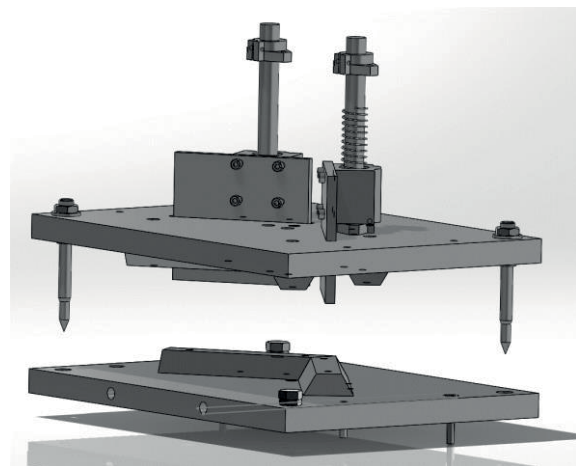
Az előformázó prés működésének szimulálásához pneumatikus munkahengert tervezünk használni. Mivel a később tervezett présszerszámmal hozzá kell férni akár manuálisan is, így szükséges a tesztpad méreteit ennek megfelelően megválasztani (hozzá lehessen férni a szerszám rögzítéséhez), emiatt viszonylag hosszú löketű pneumatikus munkahenger (min. 200 mm) használatára van szükség. A munkahenger egy keresztben átmenő gerendára fogatható fel. Így egy munkadarabon próbálható ki a megfogás hatékonysága és a prés működése. Ennek megvalósításához szükség van a munkadarab mozgására. Ehhez szintén alumínium-profil elemekre rögzített lemezeket tervezünk használni. Egy lemezen elhelyezhető a présszerszám alsó fele, a másik pedig a mozgatható szükséges vizsgálatok alaplemeze lenne. Présszerszámot célszerű úgy kivitelezni, hogy a teszt során a lehető legtöbb hiányosságra fény derüljön. A felépítése a 4. ábrán látható. Az 5D felületen kettő darab, egymást metsző borda

lenne, a felső szerszámfelel rugós rögzítőlapokkal, az erősítőanyag pozícióját tartása érdekében.



4. ábra A présszerszám első konstrukciója 5D megmunkálható felülettel, a szerszámban egy mintdarabbal.

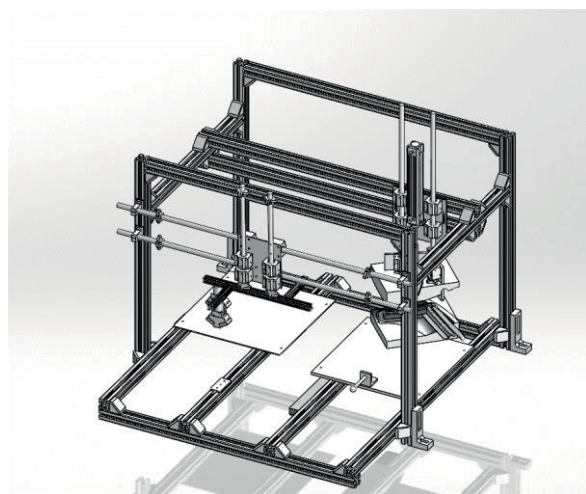
A vázolt szerszám legyártása azonban költséges a bonyolult geometria miatt, és a teszt-szerszám jellege ezt nem is indokolja. Az előformázási folyamatból elhagyható az 5D felület, a metsző bordák használata viszont célszerű. A szerszámfelek elkészítéséhez a legköltséghatékonyabb megoldás hatszög alumínium profilok felhasználásával készített síklapú szerszám, így ez kerül megvalósításra. A szerszám sematikus ábrája az 5. ábrán látható.



5. ábra A végleges présszerszám megfogólapokkal, illesztőcsapok rögzítésével.

3. ÖSSZEGZÉS

Bemutattuk a jelenleg fejlesztés alatt álló, újgenerációs kompozit alkatrészt gyártó sor megvalósításának kihívásait. Látható, hogy a végső T-RTM eljárás sikeressége nagyban függ az előkészítő folyamatok milyenségétől, továbbá az egyes folyamatok közti mozgatható pontosságától. Leírtuk a szerintünk fontos paraméterek vizsgálatának módját egy kompakt tesztpadon. A fejlesztés következő fázisa a kísérleti berendezés megépítése, a tesztek lefolytatása és az elvégzett kísérletek kiértékelése lesz. A tesztpad teljes koncepcióját a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra A tesztpad koncepciója

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) NVKP (NVKP_16-1-2016-0046) és OTKA (K 116070 és K120592) pályázatai támogatták.

A cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3-I. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000

[2] <http://www.acmanet.org/the-industry/benefits-of-composites>, 2017.10.02.

[3] Bersee H.N., Rijswijk van K.: Reactive processing of textile fibre-reinforced thermoplastic composites-An overview. Composites: Part A, 38, 666-681, 2017

[4] Bersee H.N., Beukers A., Lindstedt S., Rijswijk van K., Vlasveld D.P.N.: Reactive processing of anionic polyamide-6 for application in fibre composites: A comparative study with melt processed polyamides and nanocomposites. Polymer Testing, 25, 873-887, 2006

[5] Ben G., Nakamura K., Hirayama N., Nisida H.: Effect of molding condition on impact property of glass fiber reinforced thermoplastics using in-situ polymerizable polyamide 6 as the matrix, 18th International Conference of Composite Materials (ICCM), p6. Jeju Island, Korea, 2011

[6] <http://www.jecomposites.com/knowledge/international-composites-news/thermoplastic-rtm-process-large-series>, 2017.10.02.

[7] <https://www.engel.at/fr/fr/actualites-presse/actualites-communiqués-de-presse/details/news/detail/News/composites-europe-2017-more-efficiency-in-frp-lightweight-engineering.html>, 2017.10.02.

[8] <http://www.compositesworld.com/blog/post/video-kraussmaffei-t-rtm-demo-at-k-2016>, 2017.10.02.

[9] <http://www.compositesworld.com/news/engel-to-present-pre-series-production-solutions-at-composites-europe>, 2017.10.02.

[10] Schmalz Vacuum Catalog, 2017

[11] Gimatic Plastics Catalog, 2017

[12] FIPA Vacuum technology catalogue, 2017

[13] Chey S., Dillon G., Gutowski T. G., Li H.: Laminate wrinkling scaling laws for ideal composites. Composites Manufacturing, 6, 123-134, 1995

[14] Advani G. S., Bickerton S., Guglielmi E. S., Simacek P.: Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. Composites: Part A, 28A, 801-816, 1997